JOURNAL of CHARACTERIZATION

https://jcharacterization.com
https://jcharacterization.org

Journal of Characterization
Cilt 3, no 3, 87-94, Aralık 2023

ISSN: 2757-9166
Araştırma Makalesi

Mikroalg Aracılı Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Potansiyeli ve Uygulamaları

Necla Altın[1*] ve Başar Uyar[2]

[1*] Kocaeli Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 41380 Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0001-7879-3854), nejla_altin@hotmail.com
[2] Kocaeli Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 41380 Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0002-6267-5631), basar.uyar@kocaeli.edu.tr

(İlk geliş tarihi: 01.11.2023 ve Kabul tarihi: 21.11.2023)

(**DOI: 10.29228/JCHAR.73335**)

Sorumlu Yazar : Necla Altın, Kocaeli Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 41380 Kocaeli Türkiye, nejla_altin@hotmail.com

Referans gösterme : N. Altın ve B. Uyar, "Mikroalg Aracılı Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Potansiyeli Ve Uygulamaları " *J Characterization*, cilt. 3, no. 3, 87-94, Aralık, 2023, doi:10.29228/JCHAR.73335

Bu çalışma, 6-8 Eylül 2023 tarihleri arasında İstanbul'da gerçekleştirilen 3rd International Symposium on Characterization da sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

Öz

Enerji kaynaklarının giderek sınırlı hale geldiği bir çağda, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji üretimi arayışı ön plana çıkmıştır. Mikrobiyal yakıt hücreleri bu arayışın sonucunda ortaya çıkmış ve son yıllarda önem kazanmıştır. Bu hücreler, mikroorganizmaların biyokimyasal reaksiyonları yoluyla organik maddeleri doğrudan elektriğe dönüştürebilme yeteneğine sahiptirler. Bu çalışmada anot bölmesinde at gübresi atık suyu ve kuru mikroalg biyokütlesi substrat olarak, *Chlamydomonas sp.* mikroalg türü ise katot bölmesinde bir elektron alıcısı olarak kullanılmıştır. Her iki bölmede de grafit keçe elektrot kullanılmıştır. Bu sistemde gerçekleştirilen deneyler sonucunda 29,93 mW/m^2'lik maksimum güç yoğunluğu ve 599,6 mV açık devre voltajı kaydedilmiştir. Aynı zamanda % 49,35 KOİ giderimi elde edilmiştir. Bu çalışma, atık su ve mikroalglerin kullanıldığı çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin enerji üretim potansiyelini vurgulamaktadır. *Chlamydomonas sp.* mikroalglerinin katot bölgesinde kullanılması, fotosentetik aktivite sonucu üretilen oksijenin elektron transferinde nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, atık suyun sürdürülebilir şekillerde arıtılması ve aynı zamanda mikroalgler gibi biyolojik organizmaların enerji üretiminde kullanılmasının, çevresel ve enerji alanında umut vadeden bir strateji olduğunu göstermektedir. Bu yöntem, atık yönetimi ile yenilenebilir enerji üretimini bir araya getirerek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atıksu Arıtımı, Mikrobiyal Yakıt Hücresi, Yenilenebilir Enerji

Potential and Applications of Microalgae-Mediated Microbial Fuel Cells

Abstract

In an age where energy resources are becoming increasingly limited, the search for sustainable and renewable energy production has come to the fore. Microbial fuel cells emerged as a result of this search and have gained importance in recent years. These cells have the ability to convert organic substances directly into electricity through the biochemical reactions of microorganisms. In this study, horse manure wastewater and dry microalgae biomass were used as substrates in the anode compartment, and Chlamydomonas sp. microalgae were used as an electron acceptor in the cathode compartment. Graphite felt electrodes were used in both chambers. As a result of the experiments carried out in this system, a maximum power density of 29.93 mW/m^2 and an open circuit voltage

of 599.6 mV were recorded. At the same time, 49.35% COD removal was achieved. This study highlights the energy production potential of a dual-chamber microbial fuel cell using wastewater and microalgae. The use of Chlamydomonas sp. microalgae in the cathode region shows how the oxygen produced as a result of photosynthetic activity can be used in electron transfer. These results show that treating wastewater in sustainable ways and at the same time using biological organisms such as microalgae in energy production is a promising strategy in the environmental and energy field. This method contributes to environmental sustainability by combining waste management and renewable energy production.

Keywords: Microbial Fuel Cell, Renewable Energy, Wastewater Treatment.

1. Giriş

Uzun yıllardır tüm dünyada fosil yakıtlara alternatif olarak temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışı sürüyor. Fosil yakıtların tükenme ihtimali ve çevreye zarar verme ihtimali göz önünde bulundurulduğunda araştırmacılar yeni yöntemler üzerinde çalışmaya başlamışlardır. Bu çalışmalarla birlikte alternatif temiz enerji kaynağı olarak "biyoenerji" kavramı ortaya çıkmıştır.

Gıda ve yağ bitkileri başlangıçta biyoenerji üretimi için en çok kullanılan kaynaklardı. Zamanla bu kaynakların çok fazla alana ihtiyaç duyması ve enerji verimliliğinin düşük olması gibi dezavantajları nedeniyle yeni kaynak araştırmalarına başlandı. Bu araştırmalar sonucunda mikroorganizmaların daha az alana ihtiyaç duyması ve daha kısa sürede büyüyebilmeleri nedeniyle iyi bir alternatif kaynak olabileceği düşünüldü.

Mikroorganizmalar arasında en çok tercih edilen mikroalgler oldu. Mikroalgler ile yapılan araştırmalar 1980'li yıllarda başlamıştır. Daha sonraki yıllarda bu çalışmalar daha detaylı hale gelmiştir [1]. Mikroalgler üzerine ilk çalışmayı 1890 yılında Hollandalı mikrobiyolog Beijerinck yapmıştır. *Chlorella vulgaris* yeşil mikroalg türünün agar üzerindeki saf kültürlerini kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmiştir [2]. 1919 yılında ise Warburg *Chlorella* kültürü üzerindeki araştırmaları daha da ileriye taşımıştır [3]. 1940 ve 1950'li yıllarda mikroalg üretiminin temel özellikleri üzerinde araştırmacılar özellikle Almanya, Japonya ve sonra ki yıllarda ABD'de çalışmışlardır.

Değişen iklim şartları ve çevresel sorunlarla oluşan karbondioksit miktarındaki artışı azaltmak için canlı mikroorganizmaların kullanıldığı sistemler önem kazanmaya başlamıştır. Mikroalglerin gıda ve yem uygulamalarında, farmasötik biyoaktif bileşiklerde ve biyoyakıt üretiminde kullanılmak üzere kaynak materyal olarak umut verici olduğu yaygın olarak kabul edilen bir gerçektir. Tipik olarak birincil üreticiler olarak görev yapan bu organizmalar, hem tatlı su hem de deniz ekosistemlerindeki fitoplankton topluluklarında ağırlıklı olarak bulunur [4]. Mikroalgal biyoteknoloji çeşitli ticari kullanım alanlarında uygulama alanı bulmaktadır. Fotosentetik organizmalar olan mikroalgler, gıda ve kozmetikle ilgili amaçlara da hizmet edebilecek klorofil içerir. Bazı mikroalgler, biyoaktif bileşikler, antibiyotikler ve toksinler üretebilme kapasitesine sahip olmaları nedeniyle farmasötik endüstrisinde kullanılırlar. Buna ek olarak, mikroalgler yüksek protein, vitamin ve polisakkarit seviyeleri nedeniyle insanlar ve hayvanlar için besin takviyesi olarak alınmaktadır. Mikrobiyal enzimler, biyoteknolojinin gelişimi ile birlikte tıpta, bira ve ekmek sanayisinde, meyve suyu berraklaştırmasında, tekstil endüstrisinde, diş macunu ve deterjan üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca, bazı mikroalgler biyoyakıta dönüştürülebilen yüksek düzeyde lipitlere sahiptir.

Mikroalgal lipid üretimini uyaran faktörleri keşfetmeyi amaçlayan çalışmalar, çevresel stresin çok sayıda mikroalgal türde lipid birikimini etkilediğini ortaya koymuştur. Çalışmaların çoğu, kültür ortamındaki azot seviyelerinde bir azalmanın lipit miktarlarında bir artışa neden olduğunu göstermektedir [5]. Araştırmalar, lipit miktarlarının kültür ortamındaki azot kaynağına bağlı olarak dalgalandığını ve azot seviyelerindeki azalmanın glikozun lipitlere dönüştürülmesiyle bağlantılı olduğunu göstermiştir [6].

Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte artan çevre kirliliği ve artan enerji ihtiyacı dünyada iki büyük sorun olarak ortaya çıkmıştır. Bu yüzden çevresel sorunlara ve enerji ihtiyacına çözüm bulmak amacıyla su bertarafı ve ıslahı için daha ekonomik ve sürdürülebilir alternatifler aranmaya başlanmıştır. Son yıllarda bu araştırma konusu bilimsel araştırmacıların dikkatini çekmeye başlamıştır. Bulunan alternatiflerden mikrobiyal yakıt hücreleri çevreye minimum zarar vermesi ve elektrik üretme potansiyeli ile ön plana çıkmıştır [7].

Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH), biyoenerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren biyokütle bazlı bir enerji üretim teknolojisidir [8], [9]. Mikroorganizmaların katalizör olarak kullanıldığı mikrobiyal yakıt hücreleri atık su arıtımı

ve enerji üretimde gelecek vaat etmektedir.

Bu çalışmasının amacı bir mikrobiyal yakıt hücresinde çeşitli mikroalg türleri kullanılarak atık su arıtımı ile birlikte eş zamanlı olarak elektrik üretilmesidir. Alternatif enerji sektöründe kullanılabilecek mikrobiyal yakıt hücrelerinin verimlilikleri incelenmektedir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Mikroalg Kültür Üretimi

Çalışmalarda 2000 ml cam erlenler reaktör olarak kullanılmıştır. Katı besiyeriden alg aşılaması yapılmıştır. Kültür ortamı olarak Tablo 1'de gösterilen Blue-Green 11 (BG-11) besin ortamı kullanılmıştır. Yetiştirme sırasında numune havalandırması, TETRA APS 300 marka saatte 300 litre kapasiteli bir hava pompası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sterilliği sağlamak için 0,45 μ şırınga filtresinden geçirildikten sonra, hava pompasından gelen hava reaktörlere verilmiştir. Ayrıca bir karıştırma işlemi yapılmamıştır. Kültürlerin sıcaklığı 27±2 °C olacak şekilde ayarlanmış, kültürlerin aydınlatılması 24 saat sürekli olarak sağlanmıştır. Kültürün gelişimi UV-VIS spektrofotometre kullanılarak 600 nm dalga boyunda absorbans ölçümü ve pH metre ile pH ölçümleri yapılarak gözlemlenmiştir. Deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. *Mikroalg Kültür Üretimi Deney Düzeneği*

Tablo 1. *BG11 besi ortamı (1000 ml için)*

Kimyasal	**Miktar (g)**
$NaNO_3$	1,500
K_2HPO_4	0,040
$MgSO_4.7H_2O$	0,075
$CaCl_2.2H_2O$	0,0036
H_3BO_3	0,0029
Na_2CO_3	0,020
Citric acid	0,006
Ferric citrate	0,006
Vitamin	0,020

2.1.1. Mikroalg Biyokütle Ön İşlem

Fotoototrofik olarak kültive edilen mikroalgler biyolojik katot olarak kullanılmıştır. Kuru mikroalg biyokütlesi (*Chlamydomonas sp.*) 60 °C'de sabit ağırlığa kadar kurutulup, öğütülmüştür. Biyokütle, nem içeriğini korumak için uygun koşullar altında depolanmıştır. Elde edilen mikroalgal biyokütle, Şekil 2'de gösterildiği gibidir ve mikroalgal toz olarak adlandırılmıştır. Bu mikroalgal toz, yakıt hücresinin anot odasında bir substrat olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. *Kuru Mikroalgal Biyokütle*

2.1.2. Mikroorganizmaların Hasat İşlemi

Kültürlerde logaritmik büyüme fazından durağan faza geçiş optik yoğunluk değerlerine göre izlenmiştir. Deneyin sonlandırılmasının hemen ardından, kültürler Şekil 3'te gösterildiği gibi bir santrifüj cihazı kullanılarak 4000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilmiştir.



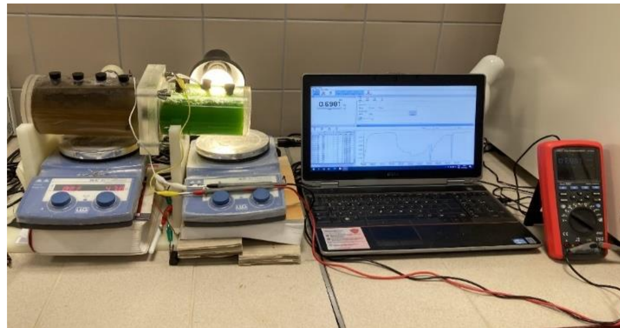
***Şekil 3*.** *Santrifüj Cihazı*

2.1.3. Mikroorganizmaların Kurutma İşlemi

Santrifüj edilen her gruptaki canlı mikroorganizmalar santrifüj tüplerinde 60°C'de etüvde kurutulmuştur.

2.2. Mikrobiyal Yakıt Hücresi Deneysel Yöntem

Mikrobiyal yakıt hücresinde bir mikroalg türü olan *Chlamydomonas sp.* ile deneyler yapılmıştır. Anot odasına at gübresi atık suyu beslenmiştir. 0,5 gram kuru mikroalg biyokütlesi (*Chlamydomonas sp.*) mikroorganizmalar için substrat olarak atık suya eklenmiştir. Katot odası BG-11 besin ortamı ile doldurulmuş, mikroalg aşılaması (*Chlamydomonas sp.*) yapılmış ve kültüre alınmıştır. Katot odasındaki sürekli aydınlatma, 7 W güç değerine ve 2400K renk sıcaklığına sahip OSRAM LED ampuller kullanılarak sağlanmıştır. Anot odası 500 rpm hızında manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Deney düzeneği Şekil 4'te gösterilmektedir.



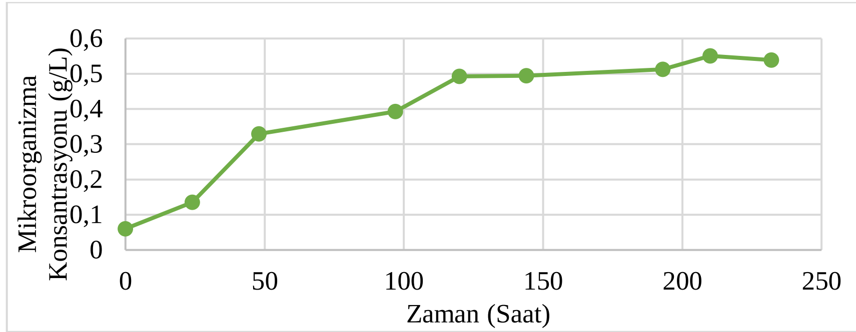
Şekil 4. *Mikrobiyal Yakıt Hücresi Deney Düzeneği*

Fotosentetik mikroalgler katot elektrotta hücrenin CO_2 fiksasyonuna ve O_2 üretmesine yardımcı olur. Katot odasında üretilen bu O_2, elektron alıcısı olarak işlev görmektedir. Mikroalg büyümesinin ve sistemin genel etkinliğinin değerlendirilmesi önemli ölçüde sıcaklık, pH seviyeleri, ışık yoğunluğu, karıştırma koşulları ve konsantrasyon gibi faktörlere bağlıdır. Bu parametrelerin reaksiyon hızı önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, olumsuz sonuçları önlemek için bu parametreleri korumak ve periyodik olarak izlemek çok önemlidir. Anot bölmesinde kuru mikroalgal biyokütle ve katot bölmesinde canlı mikroalgal hücreler içeren bir düzenek kullanılmıştır. Yakıt hücresi tarafından üretilen açık devre voltajı bir multimetre ile sürekli olarak izlendi. Kararlı bir durumda, harici direnç periyodik olarak azaltılarak ve Ohm Kanunu kullanılarak akım hesaplanarak voltaj ölçümleri alınmıştır. Hücre polarizasyon testini gerçekleştirirken, maksimum güç yoğunluğuna ulaştığımız harici yük kaydedilmiştir. Farklı harici dirençler için akım yoğunluğuna karşı güç yoğunluğunu (PD) gösteren bir grafik oluşturuldu ve karşılık gelen voltaj değerleri de çizilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

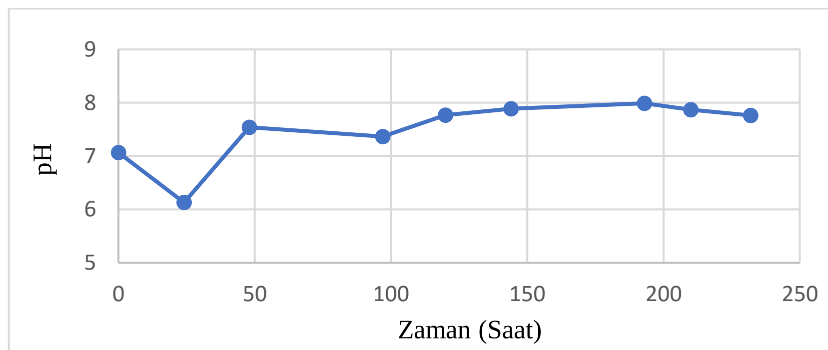
3.1. Mikroalg Kültürü Optik Yoğunluk ve pH Ölçümü

Deney süresince mikrobiyal yakıt hücresinin katot odasından 24 saat arayla düzenli olarak numuneler alınmıştır. Alınan numunelerin pH metre yardımıyla pH ölçümü, UV-VIS spektrofotometre ile 600 nm' de optik yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Elde edilen verilerden mikroorganizma konsantrasyonu – zaman ve pH - zaman grafikleri çizilmiş, mikroalglerin büyümesi gözlenmiştir. Sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. *Chlamydomonas sp.,'ye ait büyüme eğrisi*

Şekil 5'te gösterildiği gibi *Chlamydomonas sp.* deney sonlanana kadar kültür ortamında hücre sayısını arttırma eğilimini kaybetmemiştir ve büyümeye devam etmiştir. Bu da bu türün mikrobiyal yakıt hücresine iyi uyum sağladığını göstermektedir. Optik yoğunluk değerlerinden mikroorganizma konsantrasyonları hesaplanmıştır. 0,5508 g/L maksimum hücre konsantrasyonuna ve 0,0135 $saat^{-1}$ maksimum spesifik büyüme hızı belirlenmiştir.



Şekil 6. *Chlamydomonas sp.,'ye ait pH eğrisi*

Başlangıçta 7-7,50 aralığında ölçülen pH daha sonra 7,50-8,00 aralığında sabitlenmiştir. Sıcaklık deney boyunca 27 ± 2 ºC olarak ölçülmüştür. Genel olarak, çoğu alg türünün sürdürülebilirliği ve diğer istilacı organizmaların büyümesinin azaltılması için 8 ila 9 pH aralığının tercih edildiği yaygın olarak belgelenmiştir [10], [11].

3.2. Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Elektrik Üretimi

Mikroalgler biyoyakıt üretimi için hammadde olarak umut vaat etmektedir. Biyoyakıtların maliyetini düşürmenin bir başka yolu da bunları atık su arıtma ve elektrik üretimi gibi çeşitli teknolojilerle birleştirmektir. MYH'ler aynı anda atık arıtma, elektrik üretme ve biyoyakıt üretme potansiyeline sahiptir. MYH'lerde, elektron üretmek için öncelikle yakıtı, genellikle organik substratları okside ederler ve daha sonra anot elektrotunda biriktirilirler. Önemli miktarda elektrik üretmek için, daha uygun maliyetli ancak yaygın olarak bulunabilen hammaddelerin araştırılması gerekir. Bu bağlamda mikroalgal biyokütle kullanılabilir. Atık su arıtımı sırasında dünya çapında önemli miktarda mikroalgal biyokütle elde edilmektedir. Mikroalgal biyokütle biyoyakıt üretimi için kullanılmaktadır, ancak mikroalgal biyokütleden biyoyakıt üretimi henüz ekonomik olarak uygun görülmemektedir. Alternatif olarak, mikroalgler MHY'lerde substrat olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım hem atık su arıtımı hem de elektrik üretimi sağlayarak ikili bir amaca hizmet eder. Atık suda bulunan mikroorganizmalar, elektron üretmek için besin kaynağı olarak kurutulmuş mikroalgal biyokütleyi kullanır. Canlı mikroalgler katotta yetiştirilir.

Sistemlerin elektrik üretim kapasitesi Güç (P), gerilim (V) ve akım (I) çarpılarak hesaplanmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresinin güç çıkışı, yük üzerindeki gerilim (V) ve akımın ölçülmesi ile aşağıdaki Denklem 1 ile ifade edilir;

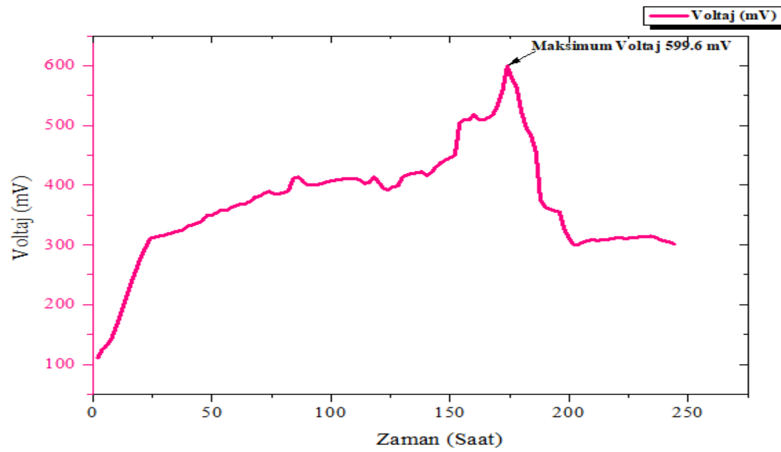
$$P = V \times I \tag{1}$$

Mikrobiyal yakıt hücresinde üretilen akım, yük üzerindeki potansiyel farkın ölçülmesi (Harici direnç, Rext) akabinde hesaplanabilir. Elde edilen ifadeyle güç çıkışı, yaygın olarak anotun yüzey alanına (A_{Anot}) normalize edilir ve güç çıkışı Denklem 2 ve Denklem 3'te gösterildiği gibidir.

$$I = \frac{V_{m-MFC}}{R_{Ext}} \tag{2}$$

$$P_{max} = \frac{V_{m-MFC}^2}{R_{Ext} \cdot A_{Anot}} \tag{3}$$

At gübresi atık suyu örnekleri ile yapılan çalışmada hücre voltajı ve akım yoğunlukları ölçülmüştür. Çalışmanın voltaj-zaman grafiği Şekil 7'de gösterilmektedir.

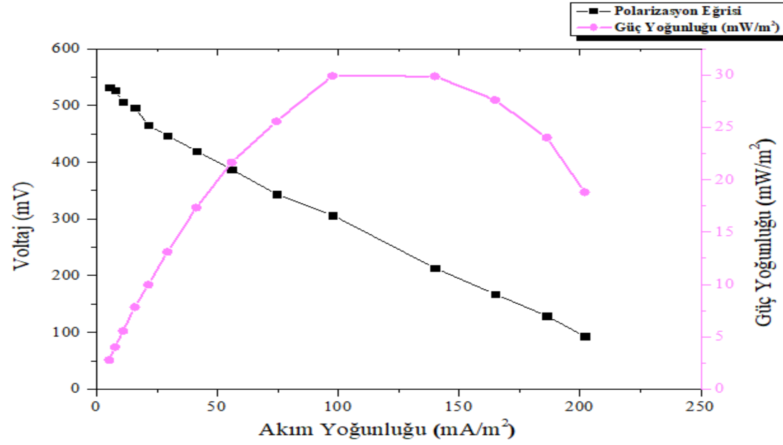


Şekil 7. *Açık Devre Voltajı-Zaman Grafiği*

Alg biyofilminin oluşması ve varlığı ile maksimum hücre potansiyeli elde edilmiştir. Yaklaşık 7 gün yakıt hücresi kararlı halde çalışmaya devam etmiştir. Daha sonra organik madde konsantrasyonun azalması ile birlikte voltaj yavaş yavaş düşmeye başlamıştır. Maksimum açık devre voltajı 599,6 mV olarak ölçülmüştür.

Güç üretimini değerlendirmek için, elektrotlar harici bir yük uygulanarak değişen dirençlere maruz bırakılmıştır. Ölçüm süresince elektrotlar arasında 1 kΩ'dan 220 kΩ'a kadar farklı dış dirençler uygulanmıştır. Bir multimetre kullanılarak her bir harici direnç için voltaj ölçülmüş ve uygulanan harici direnç miktarı değiştirildikten sonra bilgisayarın kontrolüyle voltaj için kararlı koşullar oluştuğunda okumalar yapılmıştır. Bu süre genellikle on ila on beş dakika arasında sürmüş, ancak daha yüksek dirençler için otuz dakikayı aşmıştır. Polarizasyon eğrileri, Ohm

Yasasına uygun olarak her direnç için kaydedilen voltaj verilerinden akım hesaplanarak oluşturulmuştur. Polarizasyon eğrisi-güç yoğunluğu grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. *Polarizasyon ve Güç Eğrisi*

Polarizasyon eğrilerinden yararlanılarak sistemlerin akım ve güç yoğunluğu hesaplanmıştır. En yüksek akım yoğunluğu 201,8 mA/m^2, güç yoğunluğu ise 29,93 mW/m^2 olarak bulunmuştur. KOİ giderimi %49,35 olarak elde edilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada *Chlamydomonas sp.* mikroalg türü kullanılarak MYH'nin elektrik üretim potansiyeli araştırılmıştır. MYH sisteminde biyokütle bozunması ile mikroalg yetiştiriciliği arasında sinerjistik bir ilişki geliştirilmiştir. 29,93 mW/m^2 maksimum güç yoğunluğu ve %49,35'lik bir KOİ giderimi elde edilmiştir. Bu sonuçlar, atık suyun sürdürülebilir şekillerde arıtılması ve aynı zamanda mikroalgler gibi biyolojik organizmaların enerji üretiminde kullanılmasının, çevresel ve enerji alanında umut vadeden bir strateji olduğunu göstermektedir. Bu yöntem, atık yönetimi ile yenilenebilir enerji üretimini bir araya getirerek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

References

[1] B. Neenan, D. Feinberg, A. Hill, R. McIntosh, and K. Terry, "Fuels from Microalgae: Technology Status, Potential, and Research Requirements," *Energy*, pp. 172, 1986.

[2] M. W. Beijerinck, "Culturversuche mit Zoochlorellen, Lichen-Engonidien und Anderen Niederen Algen I-III.," *Botanische Zeitung*, 48, pp. 726–740, 1890. [Online]. Available: http://img.algaebase.org/pdf/AC100CF003338161AAoHt43C4207/35049.pdf

[3] O. Warburg, "Über die Geschwindigkeit der photochemischen Kohlensäurezersetzung in lebenden Zellen," *Biochemische Zeitschrift*, 100, pp. 230–270, 1919.

[4] K. Wichuk, S. Brynjólfsson, and W. Fu, "Biotechnological production of value-added carotenoids from microalgae: Emerging technology and prospects," *Bioengineered*, 5(3), pp. 204, 2014.

[5] C. T. Evans and C. Ratledge, "Effect of nitrogen source on lipid accumulation in oleaginous yeasts," *Journal of General Microbiology*, 130(7), pp. 1693–1704, 1984.

[6] P. A. Botham and C. Ratledge, "A biochemical explanation for lipid accumulation in Candida 107 and other oleaginous micro-organisms," *Journal of General Microbiology*, 114(2), pp. 361–375, 1979.

[7] K. Kasipandian, S. Saigeetha, A. V. Samrot, S. Abirami, R. Emilin Renitta, and S. Dhiva, *Bioelectricity production using microbial fuel cell–a review*, 11(2). 2021.

[8] B. E. Logan *et al.*, "Microbial fuel cells: Methodology and technology," *Environmental Science and Technology*, 40(17), pp. 5181–5192, 2006.

[9] B. E. Logan and J. M. Regan, "Fuel Cells Fuel cells," *Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing*, (10), pp. 1–32, 2006.

[10] M. L. Bartley, W. J. Boeing, B. N. Dungan, F. O. Holguin, and T. Schaub, "pH effects on growth and lipid accumulation of the biofuel microalgae Nannochloropsis salina and invading organisms," *Journal of Applied Phycology*, 26(3), pp. 1431–1437, 2014.

[11] B. Behera, A. Acharya, I. A. Gargey, N. Aly, and B. P, "Bioprocess engineering principles of microalgal cultivation for sustainable biofuel production," *Bioresource Technology Reports*, 5(August 2018), pp. 297–316, 2019.